بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

اثر اتصال نوری بر چرخش نانو ذره فلزی در تله‌ی نوری

سید باقر احمدنژاد، فائقه حاجی‌زاده

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه‌ی زنجان، زنجان، ایران

چکیده- اتصال نوری بین ذرات به این صورت تعریف می‌شود که وقتی چند ذره توسط نور لیزر در کنار هم تله اندازی شوند، نور پراکنده شده از ذرات بر روی جای‌گیری و حرکت براونی ذرات اطراف تاثیر می‌گذارد. در این اثر، باریکه فرودی با نور پراکنده شده از ذرات اطراف باهم تداخل کرده و باعث می‌شود که ذرات نزدیک به هم، اصطلاحاً با هم جفت شدگی یا اتصال نوری داشته باشند. از مزایای اتصال نوری می‌توان به تشکیل آرایه های اپتیکی دو بعدی منظم اشاره کرد. در این بررسی با ایجاد دو تله‌ی نوری نزدیک به هم در صفحه عرضی، اثر حضور ذره دوم را بر روی چرخش یک ذره بررسی می‌کنیم. برای این بررسی یک ذره ۴۰۰ نانومتری طلا در یک تله نوری با استفاده از قطبش دایروی می‌چرخد و سرعت چرخش و حرکت براونی چرخشی این ذره وقتی که ذره مشابه در تله کناری به فواصل مشخص از ذره اول قرار گرفته، مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار حرکت براونی چرخشی ذره به صورت نوسانی بر اساس فاصله‌ی بین دو ذره تغییر می‌کند. این رفتار حرکت براونی چرخشی، رفتار نوسانی دمای ذره بر اساس فاصله‌ی بین دو ذره در تله‌ی نوری را به دنبال دارد.

کلید واژه- اتصال نوری، چرخش نوری، طیف توانی، نانو ذرات فلزی، دمای نانو ذره

Optical binding effect on optically rotated nanoparticle

Seyed Bagher Ahmadnezhad, Faegheh Hajizadeh

Department of Physics, Institute for advanced studies in basic sciences(IASBS), Zanjan, Iran

Abstract- When some particles are trapped with laser, scattered light from the particles interferes with direct light in the place of other particles and produces a new force between them, called as "Optical Binding." Constructing the two dimensions optical arrays are the products of optical binding. Here, the aim is to investigate the effect of scattered light from a particle on rotation speed and rotational Brownian motion of an optically rotated particle. In this study we provide a dual beam optical tweezers with the same wavelength and adjustable lateral distance between the trapped particles. One trap is stationary and circularly polarized, with the ability to rotate 400 nm gold nanoparticles, and the other trap is linearly polarized and is scanned at different distances relative to the rotating particle. The results show an oscillatory behavior of the rotational Brownian motion with decreasing amplitude followed by the oscillatory behavior of the nanoparticle temperature.

Keywords: Optical Binding, Optical rotation, Power Spectrum, Metallic nanoparticles, Nanoparticle Temperature

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

مقدمه

انبرک نوری ابزاریست که در سال ۱۹۸۶ برای اولین بار توسط آرتور اشکین، دانشمند آمریکایی معرفی شد و قادر به تله اندازی ذرات با اندازه‌ای از مرتبه میکرومتر و نانومتر است. اگر یک باریکه با توزیع شدت گاوسی را توسط یک عدسی با گشودگی عددی بالا کانونی کنیم، به دلیل فشار تابشی و انتقال تکانه زاویه‌ای نور به ذرات می‌توان به ذرات موجود در کانون نیرو وارد کرده و آنها را تله اندازی کرد [۱]. تله اندازی نانو ذرات طلا و نقره به دلیل داشتن خاصیت پلاسمونیک و قطبش پذیری بالا، نسبت به ذرات دیگر حائز اهمیت است چرا که در نزدیکی طول موج تشدید پلاسمون، جذب و پراکندگی زیاد می‌شوند و باعث می‌شوند تله اندازی نوری در سه بعد برای ذرات با اندازه‌ی بزرگتر از ۲۵۰ نانومتر غیر ممکن شود[۲]. از طرفی از جذب بالای فوتون‌های لیزر توسط ذره می‌توان برای چرخش این ذرات استفاده کرد که این چرخش ناشی از انتقال اندازه حرکت زاویه اسپینی نور به ذرات است[۳].

اتصال نوری ذرات در تله نوری اولین بار توسط آقای برن در سال ۱۹۸۹ بصورت تجربی نشان داده شد. برن نشان داد که وقتی دو ذره در یک تله‌ی خطی در کنار هم هستند این دو بهم نیرو وارد می‌کنند و باعث می‌شود که حضور دو ذره نسبت به هم در فواصل معینی از مرتبه طول موج فراوانی بیشتری داشته باشد. اتصال نوری بین ذرات می‌تواند باعث افزایش قدرت تله و همچنین تشکیل آرایه های دو بعدی اپتیکی شود [۵ و۴].

در این کار هدف این است که با ایجاد دوتله در صفحه عرضی و به فاصله معین از هم، برهمکنش نوری بین دو ذره که یکی از ذرات در حال چرخش است را بررسی کنیم. برای این هدف، موقعیت مکانی یکی از تله‌ها را ثابت و دارای قطبش دایروی و تله‌ی نوری دیگر را با توانایی جاروب کردن فاصله دو ذره و دارای قطبش خطی ایجاد می‌کنیم. با استفاده از سیگنال نور لیزر پراکنده شده از این دو ذره اطلاعات سرعت چرخش و حرکت براونی چرخشی را از این آزمایش استخراج کرده و تغییرات آن را بر اساس فاصله دو ذره بررسی می‌کنیم. لازم به ذکر است که از حرکت براونی چرخشی ذره می‌توان اطلاعات مربوط به دمای اطراف نانو ذره در حال چرخش را استخراج کرد.

مبانی نظری

اتصال نوری، بر پایه‌ی تداخل بین نور فرودی و نور پراکنده شده از ذرات است. مولفه‌ی نیروی ناشی از اتصال نوری در امتداد خط واصل دو ذره در تابش یک موج تخت با قطبش خطی به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$F_x(E_x,E_y,R)=\frac{\alpha^2}{2R^4}[2E_x^2\{-3Cos(KR)-3KR\,Sin(KR)+(KR^2)Cos(KR)\}+E_y^2\{3Cos(KR)+3KRSin(KR)-2(KR)^2Cos(KR)-(KR)^3Sin(KR)\}] \quad (۱)$$

در رابطه بالا R فاصله بین دو ذره، α قطبش پذیری ذرات و K عدد موج نور فرودی می‌باشد. این نیرو بر حسب فاصله‌ی دو ذره نوسانی است و دوره تناوب آن از مرتبه طول موج است[۶].

چیدمان آزمایشگاهی

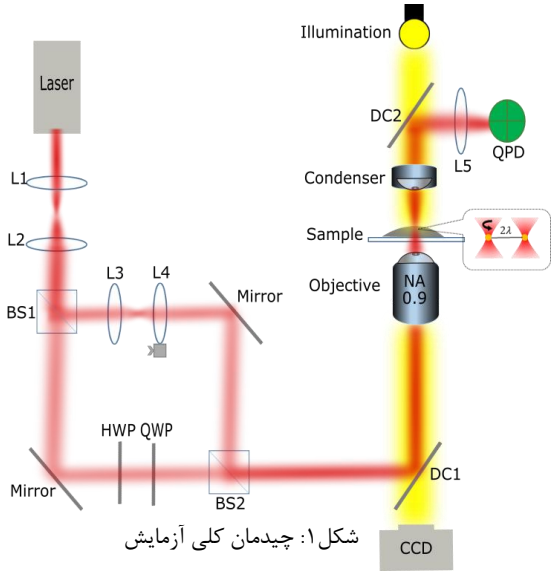
در این آزمایش از یک لیزر (Nd-YAG) با طول موج $\lambda =$ ۱۰۶۴نانومتر استفاده کردیم. نور خروجی از لیزر دارای قطبش خطی است و همانطور که در شکل ۱ آمده، پس از پهن شدن به اندازه‌ی روزنه‌ی پشتی عدسی شیئی (Zeiss) با مشخصات (63x ,Oil , NA=0.9) وارد باریکه‌شکن (BS1) شده و به دو باریکه تقسیم می‌شود. این کار به این دلیل است که دو تله جدا از هم و با فاصله معین در صفحه عرضی ایجاد شوند. درمسیر اول برای ایجاد قطبش دایروی از تیغه‌های ربع موج (QWP) و نیم موج (HWP) استفاده شد و در مسیر دوم قطبش نور لیزر همان قطبش اولیه لیزر (قطبش خطی) است. در مسیر دوم با استفاده از دو لنز با فاصله‌ی کانونی برابر، امکان جابجایی تله در راستای عرضی بدون تغییر در پهنای باریکه، وجود دارد. در این کار لنز L4 از طریق جابجاگر نانومتری که از طریق کامپیوتر کنترل می‌شود وظیفه‌ی جابه‌جایی دو تله‌ی نوری نسبت به هم را بر عهده دارد. دو باریکه‌ی لیزر توسط باریکه‌شکن دوم (BS2) به هم می‌رسند و پس از بازتاب از آینه دو رنگی(DC1) وارد عدسی شیئی شده و روی نمونه کانونی می‌شوند. نور پراکنده شده از نمونه توسط یک عدسی چگالنده (Condenser) جمع شده و با بازتاب از آینه دو رنگی (DC2) به سمت

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

فوتودیود چهارتایی (QPD) برای اندازه‌گیری جابه‌جایی ذرات هدایت می‌شود.

نتایج

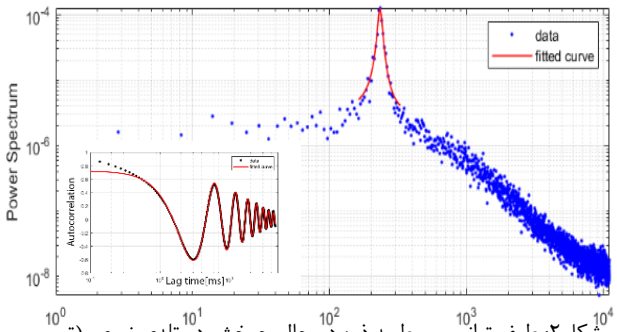


شکل۱: چیدمان کلی آزمایش

ذرات مورد استفاده در این آزمایش نانو ذرات طلا با قطر ۴۰۰ نانومتر است. بدلیل پراکندگی و جذب بالا این ذرات تله اندازی آنها بصورت دو بعدی و با هل دادن در نزدیکی سطح بالا انجام می‌شود. وقتی ذره در تله نوری تحت تاثیر قطبش دایروی می‌چرخد، در طیف توانی داده‌ها که تبدیل فوریه سیگنال فوتودیود است، یک قله ظاهر می‌شود (شکل۲). با برازش کردن رابطه۲ بر این نمودار می‌توان پهنای قله و بسامد چرخش ذره در تله را بدست آورد[۷].

$$f(x) = \frac{A}{2\pi} \times \frac{w}{(x-x_0)^2 + w^2} + B \qquad (۲)$$

در این رابطه w پهنا و x_0 نشان دهنده بسامد چرخش ذره است. روش دیگر برای بدست آوردن پهنای قله و بسامد چرخش، برازش‌کردن تابع خود همبستگی به داده‌ی اصلی فوتودیود است. نتیجه‌ی برازش کردن تابع خود همبستگی، بدست آوردن زمان میرایی t_0 برای ذره در حال چرخش در تله است (تصویر داخلی شکل ۲). رابطه بین پهنای قله طیف توانی و زمان میرایی بدست آمده از تابع خود همبستگی در رابطه ۳ آمده است[۷]. بنابراین هم می‌توان پهنا را از تابع خود همبستگی و هم بصورت مستقیم از طیف توانی بدست آورد. نکته‌ایی که در بدست آوردن پهنای قله‌ی طیف توانی اهمیت دارد این است که این پهنا نشان دهنده‌ی عدم قطعیت در اندازه گیری سرعت چرخش و یا حرکت براونی چرخشی ذره است.



شکل۲: طیف توانی مربوط به ذره در حال چرخش در تله‌ی نوری، (تصویر داخلی) تابع خود همبستگی مربوط به ذره در حال چرخش است.

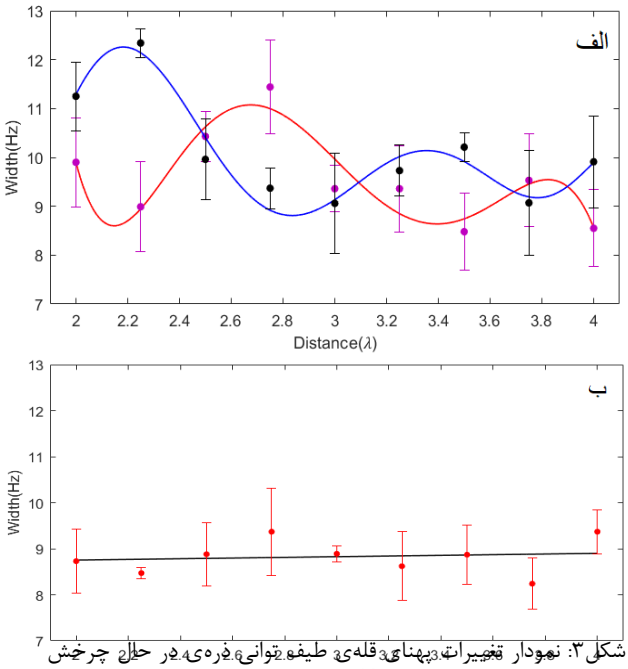
$$w = \frac{1}{\pi t_0} \qquad (۳)$$

در این کار دو تله در صفحه‌ی عرضی به فاصله 2λ ایجاد شد که تله‌ی اول دارای قطبش دایروی، و دیگری دارای قطبش خطی، در دو حالت موازی و عمود بر خط واصل دو ذره است. تله چرخان در محل خود ثابت است و تله خطی در فواصل $\frac{1}{4}\lambda$ نسبت به تله چرخان جاروب می شود و در هر فاصله، پهنای قله طیف توانی محاسبه شده و در شکل ۳ (الف) بر حسب فاصله میان دو ذره رسم شده است. برای اطمینان از اینکه لیزر به تنهایی در بوجود آمدن رفتار نوسانی نقش ندارد، آزمایش را بار دیگر برای حالتی که تله با قطبش خطی بدون ذره است تکرار کردیم. شکل۳(ب) داده‌های مربوط به جاروب لیزر نسبت به ذره در تله اول می‌باشد.

همانطور که از شکل ۳ (الف و ب) می‌توان دید، حضور لیزر بدون ذره در محل تله‌ی دوم روی نوسانی بودن پهنا اثر ندارد و این نوسانی بودن، همانطور که قبلاً در قسمت تئوری اشاره شد ناشی از نیرویی که دو ذره بهم وارد می‌کنند، است. با توجه به شکل ۳ (الف) افت دامنه‌ی پهنا با دور شدن دو ذره، بخاطر این است که هر چقدر ذرات از هم دور شوند پراکندگی که از یک ذره به ذره‌ی دیگر می‌رسد کم می‌شود و چون اتصال نوری بر پایه‌ی پراکندگی و تداخل است، بنابراین دامنه نوسان و همچنین نیروی اتصال نوری بین دو ذره کم می‌شود. نکته‌ای که در بدست آوردن پهنا حائز اهمیت است، رابطه مستقیم پهنای قله طیف توانی با دمای نانوذره در حال چرخش است که رابطه آنها مطابق رابطه ۴ است[۸].

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

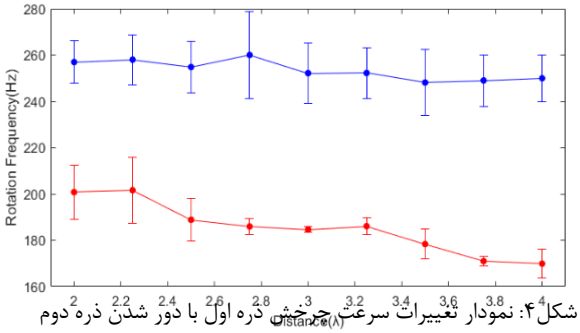
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]



شکل ۳: نمودار تغییرات پهنای قله‌ی طیف توانی ذره‌ی در حال چرخش در تله اول بر حسب فاصله میان دو ذره برای دو قطبش خطی متعامد در تله دوم. الف) داده‌های مشکی و نمودار آبی برازش شده به آنها و داده‌های بنفش و نمودار قرمز برازش شده به آنها، به ترتیب مربوط به زمانی که قطبش خطی موازی و عمود بر خط واصل دو ذره است. ب) هنگامی که هیچ ذره‌ایی در تله دوم حضور ندارد و فقط لیزر در محل تله‌ی دوم، برای یک قطبش، نسبت به ذره اول جاروب می‌شود.

$$T = \frac{8\pi^2 R^3 \eta w}{k_B} \qquad (۴)$$

در رابطه‌ی بالا، R شعاع ذره، η ویسکوزیته محیط، w پهنای قله‌ی طیف توانی و k_B ثابت بولتزمن است. بنابراین طبق رابطه ۴ و با ثابت فرض کردن ویسکوزیته محیط اطراف نانو ذره می‌توان دمای سطح نانو ذره در حال چرخش را تخمین زد. نکته مهمی که در شکل ۳ (الف) می‌توان مشاهده کرد این است رفتار نوسانی برای دو قطبش متعامد تقریبا به اندازه π اختلاف فاز دارند. یعنی در فاصله‌ایی از دو ذره که پهنای یک قطبش بیشینه است برای قطبش دیگر آن نقطه کمینه است. این اختلاف فاز، ناشی از اختلاف فاز بین تداخل نور پراکنده شده از ذره دوم (ذره در تله با قطبش خطی) در دو حالت موازی و عمود بر خط واصل و ذره اول (ذره در تله با قطبش دایروی) است. شکل۴ نشان دهنده‌ی تغییر سرعت چرخش ذره اول با دور شدن ذره دوم است. همانطور که در شکل می‌توان دید سرعت چرخش برای یک قطبش تغییری نداشته ولی برای قطبش دیگر با دور شدن ذره دوم کم می‌شود.



شکل۴: نمودار تغییرات سرعت چرخش ذره اول با دور شدن ذره دوم بر حسب فاصله بین دو ذره را نشان می‌دهد. داده‌های آبی و قرمز به ترتیب مربوط به قطبش موازی و عمود بر خط واصل دو ذره است.

نتیجه‌گیری

در این کار با استفاده از نانوذرات طلا با قطر ۴۰۰ نانومتر به بررسی اثر حضور یک ذره بر روی حرکت براونی چرخشی ذره دیگر که رابطه مستقیمی با دمای سطح نانو ذره دارد، پرداختیم. نتایج، رفتار نوسانی حرکت براونی چرخشی ذره را نشان می‌دهد که با رفتار نوسانی نیروی بین دو ذره که قبلاً مشاهد شده است، مطابقت دارد.

مراجع

[1] Williams, Mark C. "Optical tweezers: measuring piconewton forces." Biophysics Textbook Online http://www. biophysics. org/btol (2002).
[2] Hajizadeh F, Reihani SN. "Optimized optical trapping of gold nanoparticles." Optics express: 551-559, 18(2)(2010).
[3] Jain, Prashant K., Ivan H. El-Sayed, and Mostafa A. El-Sayed. "Au nanoparticles Target cancer. " nano today: 18-29, 2.1 (2007).
[4] Demergis, Vassili, and Ernst-Ludwig Florin. "Ultrastrong optical binding of metallic nanoparticles." Nano letters: 5756-5760, 12.11 (2012)
[5] Wei, Ming-Tzo, Jack Ng, C. T. Chan, and H. Daniel Lateral optical binding between two colloidal particles." Scientific reports: 38883, 6 (2016).
[6] Mohanty SK, Andrews JT, Gupta PK. " Optical Binding between dielectric particles. " Optics Express: 2746-2753, 12(12)(2004).
[7] Hajizadeh F, Shao L, Andrén D, Johansson P, Rubinsztein-Dunlop H, Käll M. "Brownian fluctuations of an optically rotated nanorod. " Optica:746-751, 4(7) (2017).
[8] Lehmuskero A, Ogier R, Gschneidtner T, Johansson P, Käll M. "Ultrafast spinning of gold nanoparticles in water using circularly polarized light. " Nano letters: 3129-3134, 13(7)(2013).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.